

デジタル通信網における平衡相互同期方式に関する研究

著者	大和 淳二
号	251
発行年	1975
URL	http://hdl.handle.net/10097/11200

氏 名	やま と じゅん じ 大 和 淳 二
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 5 0 年 7 月 2 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 2 2 年 9 月 東北帝国大学工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	デ ィ ジ タ ル 通 信 網 に お け る 平 衡 相 互 同 期 方 式 に 関 す る 研 究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐藤利三郎 東北大学教授 大泉 充郎 東北大学教授 松尾 正之 東北大学教授 斎藤 伸自 東北大学教授 野口 正一 東北大学助教授 長沢 庸二

論 文 内 容 要 旨

1 はしがき

データ通信の発達にともない、デジタル信号を経済的に交換できるデジタル通信網の実現が要請されるに至った。大量のデータの交換に適した回線交換型のデジタル通信網では、網中の各交換機のハイウェイスイッチの動作位相に他局からのデジタル信号の位相を同期させねばならず、さらにこの同期状態は伝送路の温度変化による伝播遅延の変動や、伝送路の符号誤りによっても妨害を受けることなく、維持されねばならない。

本論文はこのような局間におけるデジタル信号の同期の一方式に関するもので、その特徴は交換局相互間で相手局から受信した信号のフレーム位相に関する情報（以下制御信号と呼ぶ）の授受を行い、そのデータにもとづいて各交換局のクロック源のクロックレートを制御することで

あって、高い信頼性と安定度が得られる（この方式を、平衡相互同期方式と名付けた）。

2 平衡相互同期方式の諸特性

2.1 静特性の検討

平衡相互同期方式は、フレーム位相に関する一種の自動制御系であって、その構成を図1に示す。図中 τ_{ij} および τ'_{ij} はそれぞれ局 i から局 j への信号伝送路と制御信号伝送路の伝播遅延、 $\phi_i(t)$ は局 i のハイウェイスイッチの動作位相である。局 j は局 i から受信した信号の位相（局 j の位相を基準にする）を測定して局 i に送り返すとともに、局 i はこの位相と局 j から受信した信号の位相（局 i の位相を基準にする）の差を作り、それに比例した量だけ局 i のクロック源のフリーランニングフレームレート f_i を増減して、フレーム位相を制御する（ k_{ji} はその比例係数）。

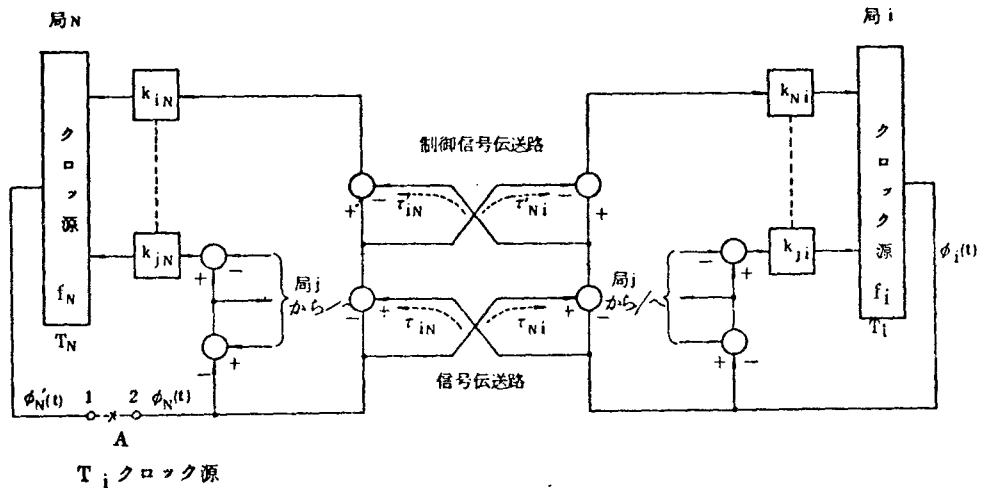


図1 デジタル通信網におけるクロック源のフレーム位相制御システム

まず局間の同期状態が確立した後の静的な特性について考察する。同期状態に入った後の各交換機に共通した系統クロックレートを f とすると、次の関係式が成立する。

$$f = f_i + \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^N k_{ji} \left\{ 2\eta_{ji} (\phi_j - \phi_i) - 2\pi f \sum_{p=1}^{\eta_{ji}} (\tau_{ji-p} - \tau_{ij-p}) \right\} \quad (1)$$

ここで η_{ji} は、局 j と局 i の間の伝送路数である。式(1)を f について解くと、

$$f = \frac{\sum_{i=1}^N f_i / k_i}{\sum_{i=1}^N 1 / k_i} \quad (2)$$

となり、 f は τ_{ij} に無関係であることがわかる（ただし $k_{ji} = k_i$ と仮定した）。また $k_i = k_0$ の

場合には、 f は f_i の平均値となる。

次に式(1)を $\phi_i(t)$ について解き、これを局 1 の位相を基準としたフレーム位相 $\phi_{1-i}(t)$ で表現すると、

$$\phi_{1-i}(t) = \frac{\pi f \left\{ \sum_{j=2}^N (\tau_{j1} - \tau_{1j}) - \sum_{j=1}^N (\tau_{ji} - \tau_{ij}) \right\}}{N} + \frac{\pi (f_i - f_1)}{k_0 N} \quad (3)$$

となる。右辺の第一項は一般に無視し得るので、第 2 項について検討するに、 10^{-7} オータのクロックレート精度を有する可変クロックレート発振器により、 $\phi_{1-i}(t)$ を $2\pi/200$ 程度の小さい値に出来ることがわかる（一般に $k_0 > 2 \text{ Hz/Radian}$ 、 N は等価的に 10 程度と考えておけばよい）。

2.2 動特性の検討

次にこの同期系の安定条件を $n_{ij} = 1$ なる完全網について求めるに、図 1 から

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_i(t)}{dt} = & \sum_{j=1}^N k_{ji} \{ \phi_i(t - \tau_{ji}) - \theta_{ji} - \phi_i(t) \} \\ & - \{ \phi_i(t - \tau_{ij} - \tau'_{ji}) - \theta_{ij} - \phi_j(t - \tau'_{ji}) \} + 2\pi \Delta f_i \end{aligned} \quad (4)$$

が成立することがわかる。この式から、点 A から通信網を見込んだ一巡伝達関数 $G_N(s)$ を求めると、

$$G_N(\theta_1, \theta_2) = A_N(\theta_1, \theta_2) + j B_N(\theta_1, \theta_2)$$

となる。ここで

$$\begin{aligned} A_N(\theta_1, \theta_2) = & \frac{H(N-1)}{\theta_1 + \theta_2} \left\{ \frac{4 \cos^2 \theta_2 (X \sin 2\theta_1 - Y \cos 2\theta_1)}{X^2 + Y^2} + \sin 2\theta_1 \right\} \\ B_N(\theta_1, \theta_2) = & \frac{H(N-1)}{\theta_1 + \theta_2} \left\{ \frac{4 \cos^2 \theta_2 (Y \sin 2\theta_1 + X \cos 2\theta_1)}{X^2 + Y^2} + 1 + \cos 2\theta_1 \right\} \end{aligned}$$

$$X = 2(N-2) \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - (N-1)(1 + \cos 2\theta_1)$$

$$Y = 2(N-2) \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - (N-1) \sin 2\theta_1 + (\theta_1 + \theta_2)/H$$

$$\theta_1 = (\theta_0 + \theta'_0)/2, \quad \theta_2 = (\theta_0 - \theta'_0)/2, \quad H = k_0 \tau_0, \quad (5)$$

$$\theta_0 = [\omega \tau_0]_2 \pi, \quad \theta'_0 = [\omega \tau'_0]_2 \pi, \quad \{ \} ; \text{ modulo 記号}$$

である。式(5)から通信網の安定条件を求めると、 $\tau'_0 = \tau_0$ ならば $\pi/4 > K \tau_0$

$$\tau'_0 \gg \tau_0 \text{ ならば } 1/2 > K \tau_0$$

となる (ただし $K = (N-1)k_0$)。

つぎに式(4)から, n_{ij} の中に 0 のものが含まれている不完全網の安定条件を求めるに,

(i) 伝送路の伝播遅延がすべて等しい場合には,

(a) 鎖状網と星状網では網中の局数には関係なく $\pi/4 > H$ ($H = k\tau_0$, $K = \sum_{i=1}^N k_{ij}$, $j=1 \sim N$)

(b) 環状網では局の総数が偶数ならば $\pi/4 > H$, 奇数ならば H の上限は $\pi/4$ より若干大きく
なるが, 5 局以上では急速に $\pi/4$ に収斂する。

(ii) 種々の伝播遅延をもった伝送路で構成される任意の形の不完全網では,

$$\pi/4 > K \cdot \max(\tau_{ij})$$

となる。

次に式(4)から $\phi_i(t)$ を求めるに,

$$\phi_i(t) = k_0 p(t - \tau_0) + k_0 p(t - \tau'_0) \quad (i = 1)$$

$$p(t) = \frac{\phi_1(0)}{2Nk_0} \sum_{m=0}^{\lfloor t/\tau_0 + 1 \rfloor} \frac{(-k_0)^m (N-1)^m}{m!} \sum_{r=0}^m \left\{ (-1)^r - \left(\frac{1}{N-1} \right)^r \right\} m C_r \cdot 2^r$$

$$\cdot e^{-k(N-1)(t-\tau_0)q} \left\{ (t-\tau_0 q)^{m+\Delta\omega_1} \frac{m}{k(N-1)} \sum_{v=0}^m \frac{(-\tau_0 q)^{m-v} (t-\tau_0 q)^{m-v}}{(m-v)! (-k)^v (N-1)^v} \right\}$$

$$q = (m-u-1) + \frac{\tau'_0}{\tau_0} (m+u-r) \quad (6)$$

となる。

また不完全網の過渡応答については,

(i) 各局からそれぞれ他の局に向う伝播遅延の組合せが, すべての局について相等しい,

(ii) 網の接続関係を示す伝播遅延の各組合せごとのグラフ行列が同時に対角行列化され得る,
の 2 条件が満足される場合には, 完全網の場合と類似の方法によって過渡特性を求め得る。

3 シミュレーション

一般の不完全網の過渡応答を式(4)から求めるのは困難であって, 計算機によるシミュレーションが有効である。シミュレーションは, 各局のクロックレートを m_i (図 2 のフローチャート参照) に比例して制御する直線制御型式と, m_i の正, 0, 負に応じてそれぞれ微小量だけはなれた 3 クロックレートの中の一つを採る 3 値制御形式について行った。

その結果直線制御の場合には,

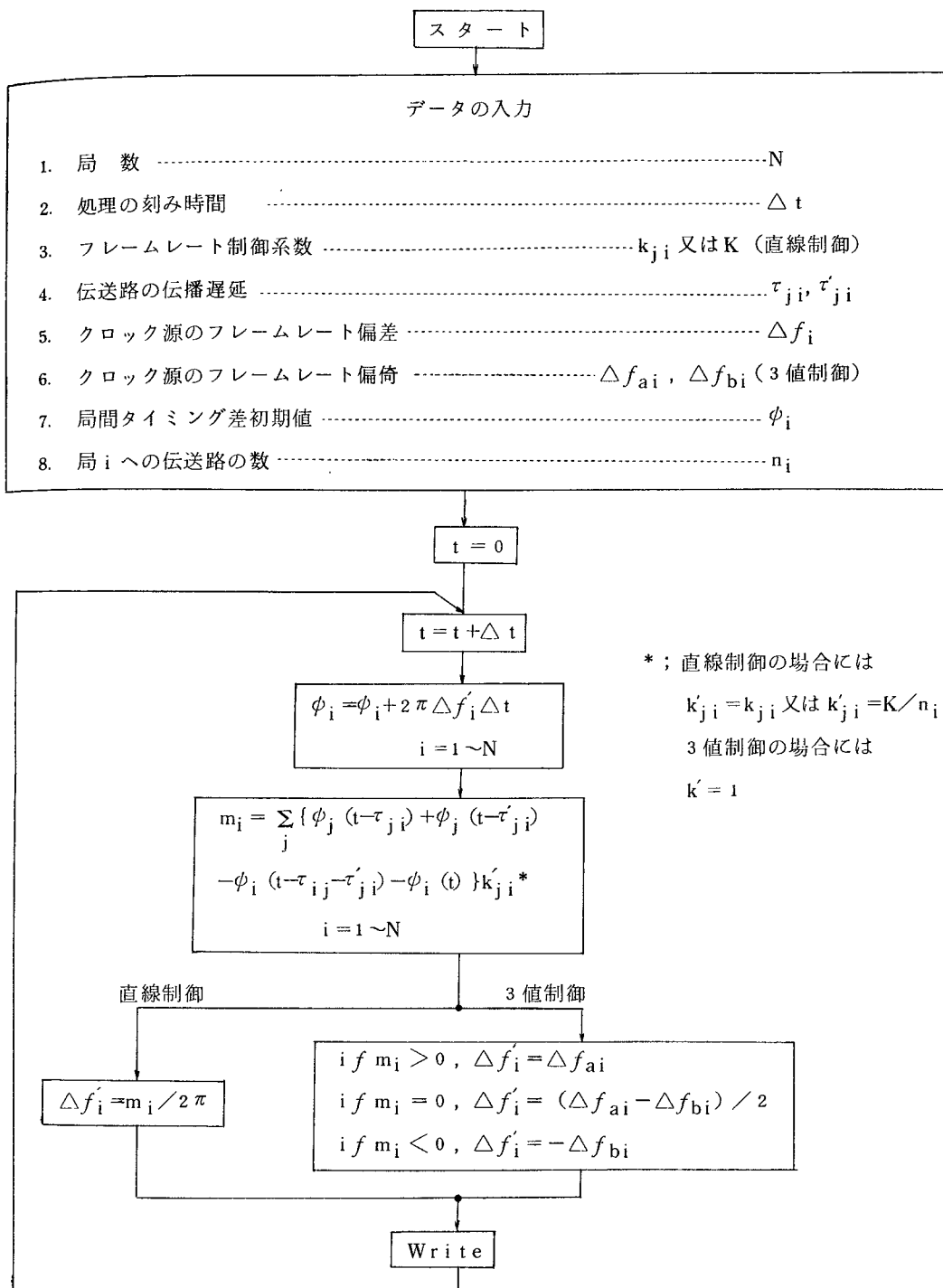


図2 平衡相互同期方式における局タイミングの過渡特性の計算機シミュレーションのためのフローチャート

- (i) 同期系の安定条件は式(5)から理論的に求めた値と一致する,
- (ii) サンプル値制御の場合には, サンプリング周期が長い方が, 安定性が増す, などのことが明らかになった。

また世界規模の仮想デジタル通信網についてシミュレーションを行い, 10^{-7} 程度の周波数精度の普通級の変クロック発振器で, 安定な同期系が得られることがわかった。また 3 値制御型式をとれば, 網は不安定にはならないことが明らかになった。

4 平衡相互同期方式の具体化と実験結果

平衡相互同期の原理によって同期装置を構成するには, 伝送路の遅延変動分を吸収するに足る可変域を持った遅延装置が必要である。そしてその構成は, フリップフロップのような記憶素子で構成した狭い可変範囲のアナログ的遅延部と, シフトレジスタのような量子化された遅延時間を持つ遅延部を直列に接続するのが, 経済的に有利である。制御信号伝送路に必要な通信容量はクロック源のクロックレートの精度によって左右されるが, 10^{-7} の精度の場合には 80 ビット/秒程度で十分である。

上述の検討結果をもとに, 実験用の同期装置 4 局分を作り, それら相互間をビットレート 1.544 Mb/s, フレームレート 8 KHz のデジタル伝送路 8 システムで種々のパターンに接続してデジタル通信網を作り, 実験を行った。その結果

- (i) 伝送路に 10^{-2} 以下の符号誤りがある,
- (ii) 伝送路に ± 1.5 ビット以上のランダムジッタがある,

と言った苛酷な条件下でも, 確実に同期動作が行われることを確認するとともに, (i), (ii) の外乱が無い場合には, 4 局の位相が $2\pi/2000$ 以下の位相精度で一致するなど, 理論解析および計算機シミュレーションによって得られた結果を裏付ける実験結果を得ることができた。

5 結 言

平衡相互同期方式では, すべての伝送路が局間のデジタル信号の同期の確立と維持に平等に寄与するので, 小数の伝送路の障害は単に同期に関与する伝送路の数の減少を意味するに止まり, 同期動作には何の支障も与えない。またこの同期方式では, 同期装置の重複化構成も容易であるので, 高い信頼度の同期系を構成することが出来る。

この研究によって, デジタル通信網における最大の課題の一つである局間同期に対して解決の糸口が得られたものと考えてよく, 全世界を覆う完全同期型式のデジタル通信網も, 一層現実化してきたと言い得る。

審 査 結 果 の 要 旨

近年データ通信の発達に伴い、デジタル信号を経済的に伝送、交換できる大規模なデータ通信網が構成されつつある。デジタル通信網を安定に動作させるために、広範囲に散在する交換局間のデジタル信号の位相を同期させる技術的手法の確立が要望されている。著者は、大規模なデジタル通信網の局間の同期方式として、平衡相互同期方式を新しく提案し、その同期特性を理論的、実験的に研究した。本論文はそれらの成果をまとめたもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。第2章では、著者の提案になる平衡相互同期方式と他の同期方式の差異を述べ、本方式における各局間往復伝送路の伝搬遅延時間差や、クロック発振器の周期変動などによるパルス間隔の変動幅と同期調整用バッファメモリの許容容量との関連を、同期の静特性として理論的に解析し、本方式が他の同期方式に対し経済的に優れていることを示している。

第3章では、任意局間の平衡相互同期方式の安定条件の解析結果について述べている。即ち、各局間のパルス伝搬遅延が安定条件に及ぼす影響を、フレームレート制御係数を考慮して解析し、他の同期方式に対し制御特性及び信頼性の点で優れていることを明らかにしている。

第4章では、平衡相互同期方式を適用した通信網のフレーム位相の過渡応答の解析結果について述べている。即ち、局間におけるフレーム位相差は、一般に複数の安定点があるが、一つの安定点から他の安定点への移動は、実用の範囲では生じ得ないことを明らかにしている。

第5章では、複雑なデジタル通信網の同期の過渡応答を、計算機シミュレーションした結果について述べている。即ち、クロックレートを直線制御、3値制御した場合の安定条件及び過渡応答特性が、第3章、第4章の理論と一致することを示している。また、世界主要50都市を結ぶ、仮想デジタル世界通信網についてシミュレーションを行い、 10^{-7} 程度の精度を有するクロック発振器で、安定に同期が得られることを明らかにしている。

第6章では、4局分の平衡相互同期装置を試作し、種々の条件のもとで、同期特性を実験的に求めた結果を述べ、前章までの理論及びシミュレーション結果とよく一致し、本方式が経済性及び信頼性の点で優れていることを示している。第7章は結論である。

以上要するに、本論文はデジタル通信網を構成するのに必要な同期について、経済的かつ信頼性の高い、新しい平衡相互同期方式を提案し、理論と実験により、その特性を明らかにしたもので、通信工学、情報工学に資するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。